

山手トンネル内における渋滞緩和を目的とした エスコートライトの整備

CONSTRUCTION OF ESCORT LIGHT FOR EASE OF TRAFFIC CONGESTION IN YAMATE TUNNEL

野上 拓真¹・川野 祥弘²・小山 俊泰³・岩崎 聖⁴

Takuma NOGAMI¹, Yoshihiro KAWANO², Toshihiro OYAMA³
Satoru IWASAKI⁴

Traffic congestion on expressway causes time-loss and rear-end accident. One of the causes is speed reduction on rising slope. In order to solve this problem, Expressway companies construction traffic guide lamp for speed recovery. The traffic guide lamp called “Escort Light”, which was constructed at Route No.3 Shibuya Line in February 2015. As a result, the traffic congestion loss time has decreased by 13%. Traffic congestion is also occurred because of speed reduction in Nakano-chojabashi(Central Circular Route). Since this section is in Yamate Tunnel, we discuss ideal Escort Light in tunnel space.

Key Words :Traffic congestion, Traffic control system, Tunnel space, Up slope

1. 緒論

高速道路における渋滞は、時間の損失や追突事故など様々な問題の原因となっている。渋滞が発生してしまう原因の一つは上り坂での速度低下によるものである。緩やかな上り坂では、運転手は上り坂へ差ししかかったことに気づかず、無意識に走行速度が低下してしまうことがある。その為、後続車は走行速度が低下した前の車両との車間距離を確保するため、ブレーキを踏むことになる。交通量の多い状態では、後続の車両が次々とブレーキを踏み、渋滞が発生してしまう。

このような問題点を解決するために、各高速道路会社では視覚効果によって走行速度を回復させる、速度制御支援システムを導入している。図-1に示すように、路側に設置した灯具が車両進行方向へ一定速度で連続的に光を流す事で、ドライバーの速度感覚を制御し、追従して走行速度を回復させる効果を狙ったものである。首都高速道路ではこのようなシステムを「エスコートライト」と呼び、2015年2月に初めて高速3号渋谷線（下り線）の

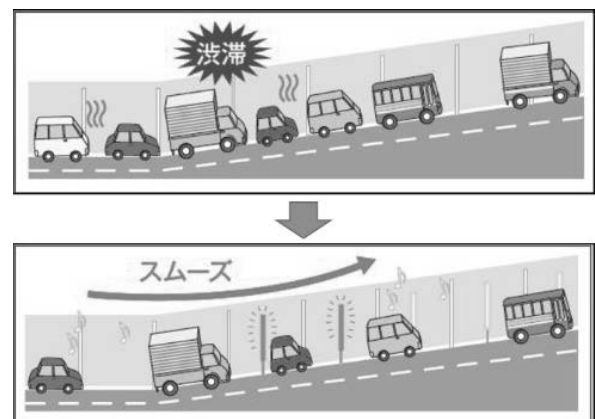


図-1 誘導灯による速度制御支援システム

上り坂に設置し、渋滞損失時間が13%減少するなどの渋滞緩和の効果をj得ている。

今回述べる高速中央環状線山手トンネル（内回り）の中野長者橋出口付近もまた、緩やかな上り坂によって渋滞が問題となっている箇所である。さらに、当該箇所はトンネル内であるため、トンネル空間において最適な誘

キーワード：交通渋滞、交通管制システム、トンネル空間、上り勾配

¹非会員 首都高速道路株式会社 東京西局 施設管制所 Metropolitan Expressway Company, (E-mail: tnogami810@shutoko.jp)

²非会員 首都高速道路株式会社 計画・環境部 快適走行推進課 Metropolitan Expressway Company.

³非会員 首都高速道路株式会社 東京西局 施設保全設計課 Metropolitan Expressway Company.

⁴非会員 首都高速道路株式会社 東京西局 調査・環境課 Metropolitan Expressway Company.

導効果を得るためのシステム仕様について検討する必要があった。

本論文では、高速中央環状線山手トンネル内に整備したエスコートライトシステムの概要と、その効果検証について述べる。

2. 導入事例

本章では視覚効果による速度制御支援システムの導入事例について紹介する。

NEXCO東日本では、「自発光式ペースメーカー」と呼び、2011年2月から東北自動車道や三陸自動車道において約200mの区間に10m間隔で緑色のLED灯具を設置している¹⁾。これにより、渋滞継続時間が50分から30分へ短縮するなど渋滞緩和の効果を得ている。その他の事例として、東京湾アクアラインでのトンネル内渋滞対策として、青色のLED灯具を約200mの区間に10m間隔で設置している。これにより、アクアライン上り線全体での渋滞量が約2割減少するなどの効果を得ている。

渋滞緩和を目的としたものではないが、速度感覚を制御する誘導灯の応用例として、NEXCO西日本では下り坂でカーブが連続する区間での安全対策として、視線誘導装置を設置している²⁾。これは、制限速度よりも少し遅い速度で光を流すことにより、速度超過を防止するためのものである。これにより、制限速度以上で走行する車両の割合が減少したと報告されている。

首都高速道路においても、高速3号渋谷線（下り線）の池尻 - 三軒茶屋間の約234mの区間に図-2に示すような灯具を3m間隔で79台設置をした。その他にも、図-3に示す箇所（扇大橋、千住新橋、東京港トンネル）にエスコートライトを設置している。

3. 仕様検討

(1) 設置区間

高速中央環状線（内回り）の中野長者橋出口付近は、2015年3月に高速中央環状線の全線開通によって交通需要が増加し、新たに渋滞が顕在している箇所である。その主な原因は中野長者橋出口手前の緩やかな上り坂に起因する速度低下によるものである。当該区間を図-4に示す。約3%の上り坂が2箇所存在しており、無意識の速度低下を引き起こす要因となっている。そのため19.8～20.4kpの約570m区間（設置区間①）と、18.8～19.1kpの約300m区間（設置区間②）にエスコートライトを設置することが渋滞緩和に最適と判断した。

(2) 灯具形状

高速3号渋谷線（下り線）の池尻 - 三軒茶屋間にエスコートライトを導入する際には、灯具製作前に丸型および縦長の形状の灯具を仮設し、普通車と大型車からの見え方を確認した。その結果、双方から見えやすい縦長の形状が望ましいとの意見が多く挙がったことから、縦長（630mm×62mm）の灯具を採用している。この縦長の灯具は当該箇所において渋滞緩和の実績も持つことから、



図-2 高速3号渋谷線池尻付近のエスコートライト



図-3 エスコートライト設置区間

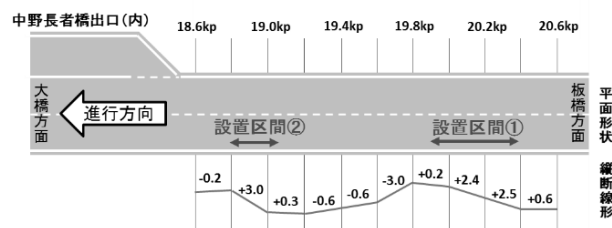


図-4 整備区間（中野長者橋出口付近）

山手トンネル内に導入する灯具形状も同様に縦長の形状とした。

トンネル内でエスコートライトを導入するにあたり、防水・防塵性能についても検討する必要もあった。トンネル内は降雨による影響は受けにくいものの消火用の水噴霧設備があり、高い防水性能が求められる。また閉鎖空間であるため高架部よりも排気ガスの粉塵も滞留しやすくなる。そのため山手トンネル内に設置する場合において、必要な保護等級はIP55（防塵形・防噴流形）とした。これは首都高速道路においてトンネル照明として要求している防水・防塵性能と同等の規格である。

(3) 発光色

首都高速道路では、これまで緑色または青緑色で発光するエスコートライトを導入しており、図-5に示すように2016年6月に設置した東京港トンネルのエスコートライトも緑色の灯具を採用している。

一方で、トンネルの中では緑色よりも青色が知覚しやすいという文献もあり、実際にNEXCO東日本では明かり部は緑色、トンネル部では青色を採用し、環境に応じて色を使い分けている³⁾。図-6に光の周波数と人間の目の可視効率の関係を示す⁴⁾。人間の目は周辺の明るさによって知覚しやすい色が異なり、夜間やトンネル内など光量が少ない場所では青色、明かり部では緑色が知覚しやすくなっている。以上を踏まえ、山手トンネル内に導入するエスコートライトの発光色を再度検討することとした。

最適な発光色を選定するため、実際に灯具を設置する山手トンネルの中野長者橋出口付近で灯具の視認性実験を行った。図-7に示すように、緑色、青緑色、青色の3種類の灯具を用意し、走行車線と追越車線から視認性を確認し、16名の被験者からアンケート調査を行った。調査結果を図-8に示す。調査の結果、1番適切だと評価された色は青色で、約70%の被験者が最も見えやすい色として選んだ。緑色はトンネル内の非常電話や標識と、青緑色はトンネル用の信号機と混同する恐れがあるという意見が多く挙がった。青色については他の設備の色と区別がついて良いという意見が多く、これらの結果から灯具の発光色は青色を採用することとした。

(4) 設置方法

中野長者橋出口付近はトンネル内であるため、トンネル内に設置されている防災設備等との設備位置関係に注意が必要であるとともに、エスコートライトとしての効果が十分発揮される位置、間隔で設置する必要がある。図-9に中野長者橋出口付近の山手トンネル断面図を示す。設置区間②は右側（追越車線側）に避難通路が存在し、設置が困難である。また、右カーブとなっている場所で

あり、視認性を確保するために左側（走行車線側）に設置をするほうが望ましいと考えられた。従って、設置区間①、②ともに左側（走行車線側）に設置することとした。設置方法としては、走行車線側に管理用通路が存在するため、管理用通路の上にポールを設置して自立式設置とするか、トンネルの壁面設置が候補として挙げられた。設置予定箇所（山手トンネルの走行車線側）には非常電話や泡消火栓設備等の設備が点在している。そのため、



図-5 東京港トンネルに設置したエスコートライト

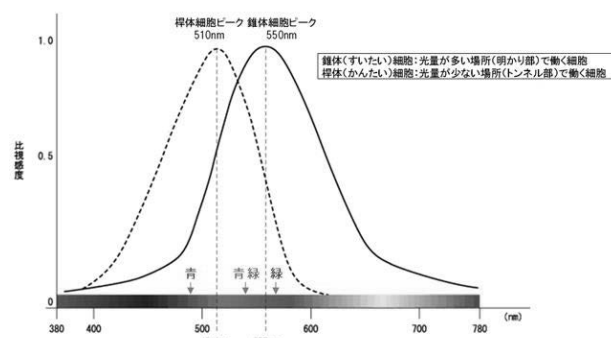


図-6 光の周波数と可視効率⁴⁾

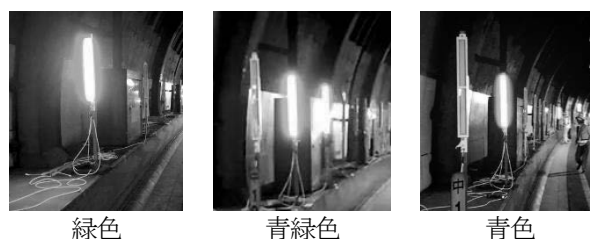


図-7 エスコートライト発光色比較

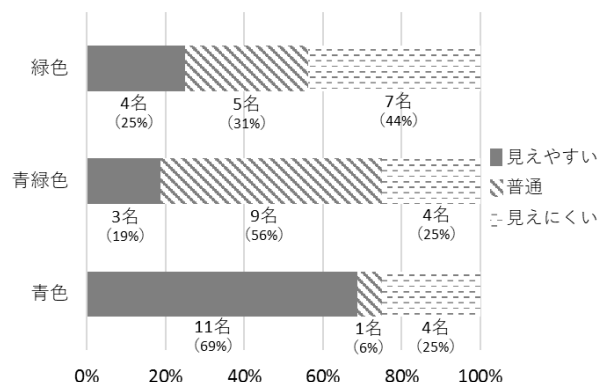


図-8 視認性調査結果

壁面に設置をすると他設備と干渉する可能性がある。エスコートライトは、光が連続的に流れるように見えることによって誘導効果が得られるため、他設備との干渉を無くす必要がある。ポールを用いた自立式設置をする場合は、車路に近い所まで発光部を寄せられるため他設備との干渉を無くすことができる。条件を考慮し、本工事では管理用通路上にポールを設置し、自立式設置することとした。設置区間①は3m間隔で190灯（約570m）、設置区間②は3m間隔で101灯（約300m）設置をしている。

(5) 制御パラメータ

今回設置をしたエスコートライトは下記に示す点灯速度、輝度、点灯パターンの制御が可能となっている。これは施工後に様々な組み合わせを試験し、効果検証をするために用意したものである。制御パラメータは図-4に示す設置区間①、設置区間②での個別制御が可能とした。さらに、設置区間①については570mと距離が長いので、より柔軟に交通状況に対応できるよう、制御範囲を前200mの区間Aと後ろ370mの区間Bの2つに分けている。

a) 点滅間隔

灯具の点滅間隔は0.18秒、0.15秒、0.13秒の中から選択できるようになっている。点滅間隔によって運転手の感じる速度が変わるため、区間に応じて最適な点滅間隔を後から変更可能となっている。

b) 輝度

輝度は1%単位で細かく制御が可能となっている。トンネル内の照明設備は時間帯によって調光制御を行っており、理科年表の日出、日没の時間に準じて照明の輝度を変更している。そのため輝度制御をかけないとエスコートライトが周辺の照明よりも眩しくなってしまうため、エスコートライトの輝度も周辺の照明設備の輝度に合わせる形で運用している。

c) 点灯パターン

点灯パターンは図-10に示すように、灯具8灯を1セットとし、1灯7滅、2灯6滅・・・といったように、8灯の内の点灯・消灯数の組み合わせになる。先に述べた視認性実験の際に、1灯7滅と2灯6滅の見え方比較も行った。実験の結果、2灯6滅の方が視認性が良いとの意見が多かったことから、2灯6滅をベースにして運用を行っている。

(6) トラフィックカウンターによる点灯制御

エスコートライトは、車両が緩い上り坂に差しかった際に走行速度が低下してしまうことを抑制するための設備であるため、完全に渋滞が発生してしまった後の状況では十分な効果を得られない。そのため、交通状況に応じた柔軟な点灯制御が求められる。そこで、トラフィ

ックカウンターを利用した点灯制御機能を実装することとした。トラフィックカウンターとは超音波の反射によって車両の通行を検知する機器であり、5m間隔で設置した2地点の検知時間の差分によって、車両の通行速度を算出することが出来る。エスコートライトとトラフィックカウンターの位置関係を図-11に示す。エスコートライトの設置区間①には、LED灯具が190灯設置されており、その前後には、超音波型のトラフィックカウンターが設置されている。この2地点から速度情報を取得し、

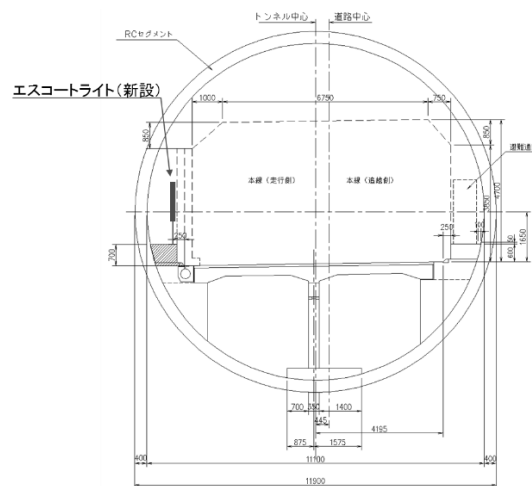


図-9 山手トンネル断面図（設置区間②の例）

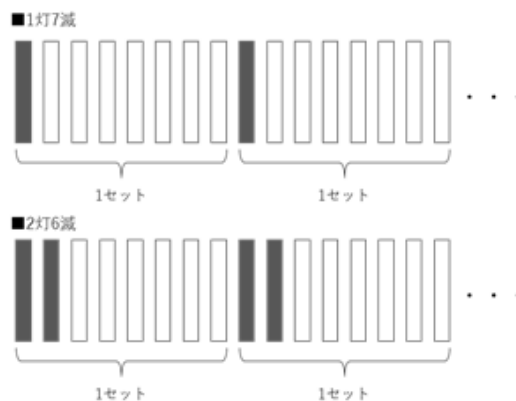


図-10 エスコートライトの点灯パターン



図-11 トラフィックカウンターによる点灯制御

エスコートライトの点灯制御を行っている。図-11に示す地点A、地点Bの2箇所、つまり設置区間①内の車両の走行速度が10km/h以下の判定となった場合エスコートライトを消灯し、20km/h以上の判定となった場合に点灯させるよう制御している。ここで、消灯時と点灯時で渋滞判定の値が異なるのは、検知速度が判定閾値付近で前後した時に消灯と点灯を繰り返してしまうチャタリングを防ぐためである。

4. システム構成

(1) 構成機器

本システムは大きく、灯具、電源、増幅器の端末系と、灯具の制御を行う制御系に分けられる。

灯具は基本的に3m間隔で設置され、灯具16台につき1台の直流電源装置が必要となる。灯具の点滅制御にはDMX信号を用いているが、このDMX信号は約200mで減衰してしまうため、途中に信増幅器を中継する必要がある。これらはすべて灯具と同じく本線管理用通路上の設置となる。そのためこれらの機器に対しては、車両接触した際に本線側へ転倒し二次被害が発生するのを防ぐため、フェイルセーフを施している。器具に取り付けたワイヤーを、管理用通路上のアイボルトと接続し、固定している。また、灯具については角度調整を行う関係上ポール部と灯具部が分かれているため、図-12のように別途ポール部と発光部を、器具内部を通してワイヤーで接続している。

制御系は図-13のように点滅制御装置、DIOコントロー

ラ、信号合成部、制御ユニット、タイムスイッチから構成される。

DIOコントローラはLAN経由で受け取った制御パラメータを受け、点滅制御器へ接点で渡す役割を持つ。制御できるパラメータと接点数の関係上、本システムでは1つの点滅制御器に対して2台必要となる。点滅制御器はDIOコントローラから接点として受け取った信号から灯具制御に用いるDMX信号を生成する。

生成されたDMX信号は信号線を介して灯具に伝送されるが、先述の通り本システムの設置区間①はさらに区間Aと区間Bの2区間に分けて制御が可能となっている。しかし、それぞれの区間に対して個別で信号線を引くのは効率が悪いので、設置区間①については信号合成部を別途設けている。これにより個別の制御が可能な2つの区間に対して、信号線を1つに集約することが出来る。

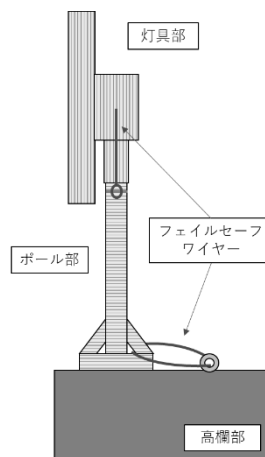


図-12 灯具のフェイルセーフ施工

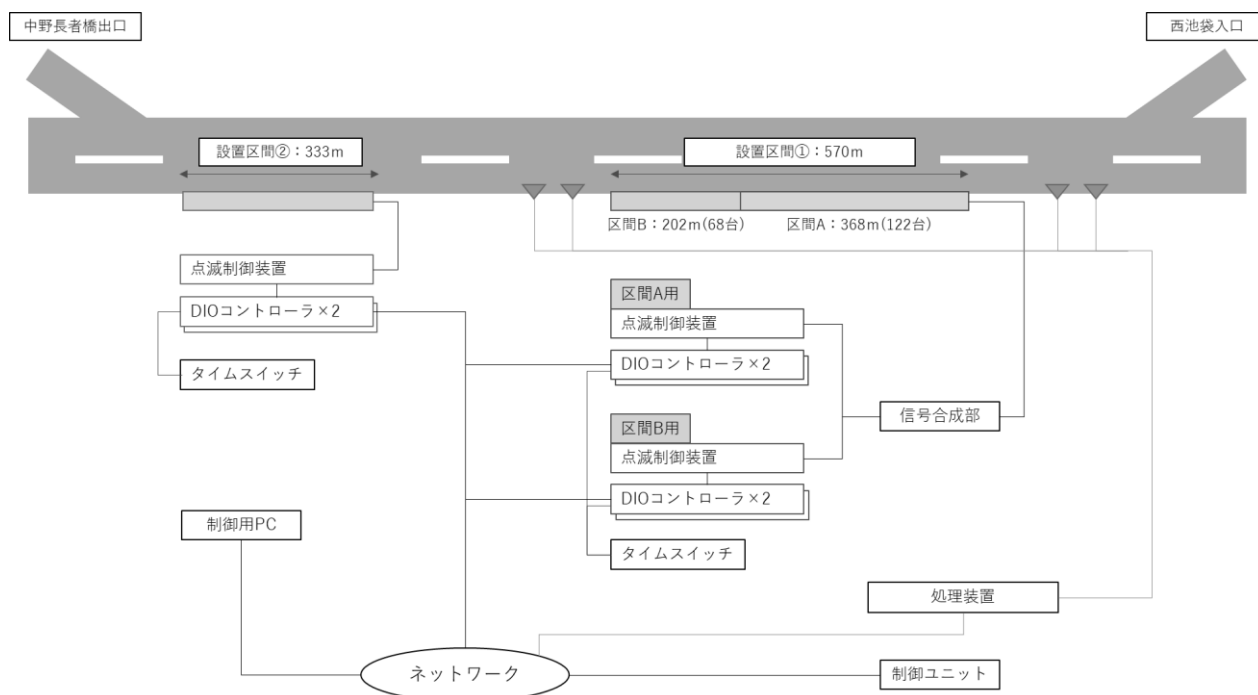


図-13 エスコートライトシステムの制御系統

制御ユニットは先述のトラフィックカウンターとの連動によってエスコートライトの点灯制御を行うための機器である。トラフィックカウンターのパルスデータは処理装置にて交通量や速度データとして処理される。制御ユニットはネットワーク経由でこのトラフィックカウンターユニットから各種データを受け取る。タイムスイッチは年間を通しての日の出・日の入時刻の情報を有しており、昼夜の判定を行う。

これらの機器は換気所内の通信機械室に設置され、ネットワークを経由して、交通管制室から制御や、運用・回線状態の監視等を行うことが出来る。図-14に以上の構成により施工したエスコートライトの写真を示す。



図-14 中野長者橋に設置されたエスコートライト

(2) パラメータ設定並びに運用

3章で述べたエスコートライトの制御パラメータは、予め設定された定義ファイルに基づいて曜日や時間帯に応じて自動で切り替わるようになっている。

ただし、一時的なパラメータ変更については専用の制御PCを用いて、遠隔で変更することも可能である。本システムについては前述の通りトラフィックカウンターとの連動で渋滞の際には自動で消灯するが、その他有事の際に強制消灯をかけることも可能である。各制御パラメータの設定範囲については表-1を参照されたい。

表-1 エスコートライトの制御パラメータ一覧

項目名	選択範囲	説明
点滅間隔	0.18秒 0.15秒 0.13秒	LEDの点滅間隔を定義する
点灯数	1~8	LED8灯具の点灯数を定義する 1: 1灯7減 2: 2灯6減 3: 3灯5減 4: 4灯4減 5: 5灯3減 6: 6灯2減 7: 7灯1減 8: 8灯0減 (全点灯)
輝度	10%~100%	LEDの輝度を定義する (1%単位で設定可能)
消滅	消滅	LEDの消滅を定義する

5. 効果検証

(1) 検証対象

本システムは設置区間②を先行して整備し、その後設置区間①の整備を行っている。よって検証対象期間としては、設置区間②のエスコートライト設置前である2016年11月（11月1日～11月30日の1か月間）と、設置区間①のエスコートライト設置後である2017年7月（7月1日～7月31日の1か月間）とし、渋滞時の捌け交通量、速度などの交通データの比較を行った。両期間の日交通量の変動は図-15の通りであり、平均台数はそれぞれ2016年7月で42880台、2017年7月で44326台となっている。また、その内の大型車混入率は2016年7月で17.8%、2017年7月で17.1%である。

時間帯については、エスコートライト点灯時間帯である平日の5:00～16:00の間を対象としている。加えて、1日に複数回の渋滞が発生した場合は、最初の渋滞を評価対象とした。

(2) 捌け交通量

まず初めに、渋滞時の捌け交通量についての評価を行った。評価にあたっては、以下の2つの指標を用いた。

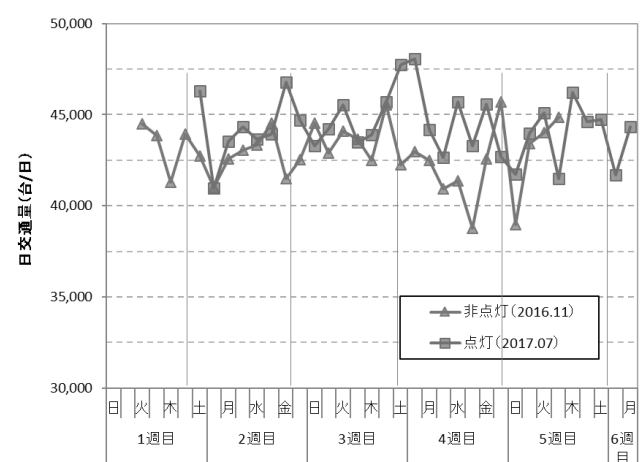


図-15 検証対象期間の日交通量

a) 渋滞発生時交通量

渋滞発生直前15分から直後15分までの30分間に観測された地点C（図-11参照）における15分間フローレートの最大値（1時間換算値）とする。

b) 渋滞発生後捌け交通量

渋滞発生後から渋滞解消までの地点Aにおける平均フローレート（1時間換算値）とする。ここで、渋滞解消は地点A（図-11参照）のトラフィックカウンターの速度が40 km/h以下に低下し60 km/h以上に回復するまでとした。また、先詰まり渋滞発生時および事故等の特異事象発生時間帯を除いている。

上記2つの交通量算出に当たっては、大型車の混入割合に関する影響を除去するために、乗用車換算台数（PCU：Passenger Car Unit）という単位を用いた。

図-16に渋滞発生時交通量と渋滞発生後捌け交通量の比較をそれぞれ示す。渋滞発生時交通量についてはエスコートライト運用後に渋滞発生時の捌け交通量が増加していることが分かる。先述の通り、設置後の1日当たりの平均交通量については設置前と比較して200台ほど増加していた。一方で、渋滞発生後捌け交通量については、設置前後でほとんど変化が見られなかった。

(2) 速度

次に、渋滞時の車両速度に関する評価を行った。速度データはエスコートライト整備区間の最上流になる地点Aと最下流になる地点Cのトラフィックカウンターのデータを用い、5分間の平均速度の比較を行った。なお、整備区間の中間に位置する地点Bのトラフィックカウンターについては、本解析時点では機器故障の関係でデータ欠測がみられたことから、本議論の対象外とした。

図-17に渋滞発生時速度を、図-18に渋滞発生後の速度の比較をそれぞれ示す。まず図-17の渋滞発生時速度に着目してみると、ボトルネック部分にあたる地点Aにおいて、点灯前後で平均速度の上昇が確認できる。つまり、エスコートライトの点灯によって車両の通過速度が上昇したことが伺える。一方で、地点Cに関してはエスコートライトの点灯に関わらず平均速度が60 km/h以上出ており、変化もほぼ見られない。これは、地点Cのトラフィックカウンター設置個所が勾配終了後であり、車両が渋滞していない（自由流）ためである。

次に図-18の渋滞発生後速度に着目してみると、やはりボトルネックの箇所にあたる地点Aにおいて平均速度の増加が確認できた。一方で、地点Cに関しては比較的にスムーズな交通流を維持できているものの、エスコートライトの点灯前後でわずかに速度の低下がみられた。

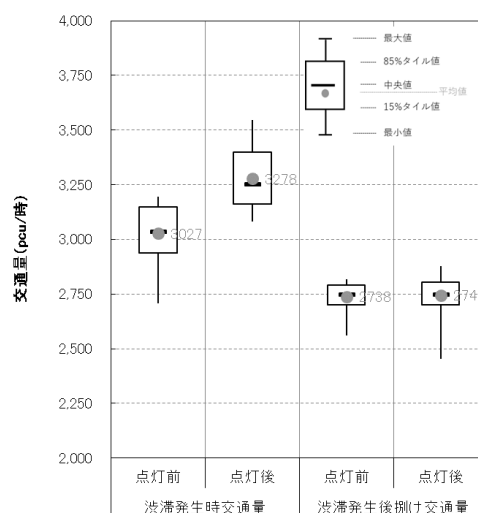


図-16 エスコートライト点灯前後の渋滞時交通量

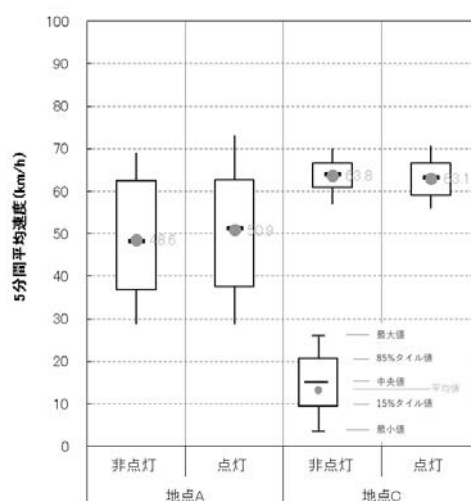


図-17 エスコートライト点灯前後の渋滞発生時速度

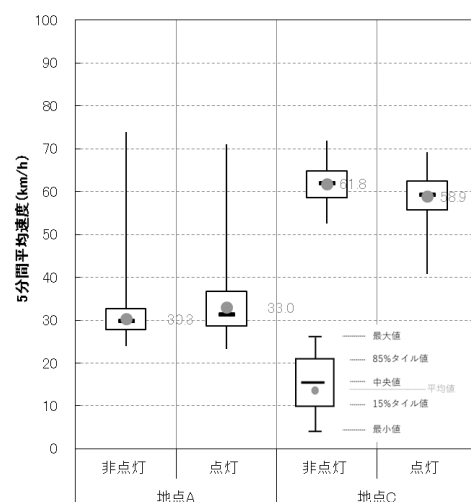


図-18 エスコートライト点灯前後の渋滞発生後速度

6. 結論

本論文では、首都高速道路 中央環状線山手トンネル（内回り）の中野長者橋出口付近に設置されたエスコートライトシステムについて、その仕様検討と導入後の効果検証を述べた。

この山手トンネル内には防災設備や非常標識設備がいくつも設置されており、それらの視認性に影響しないよう、灯具の設置個所等について検討を行った。また、灯具色は現地にて現物による見え方を確認した上で、青色を採用している。

エスコートライト点灯前後の交通状況を比べると、まず渋滞発生時交通量について、点灯後に増加していることが確認された。また速度については、渋滞発生時、渋滞発生後のどちらにおいても、渋滞のボトルネック部にあたる地点において改善効果がみられており、エスコートライトによる速度制御支援の効果が表れた。

今後は、より詳細な検証のため長期間での交通データを用いて分析を行っていくとともに、車頭間隔や渋滞損失時間といった観点からも評価を行っていく。また、点

滅間隔や点灯パターンといった制御パラメーターを変え、それらが交通に及ぼす影響についても検証を行い、最適な運用を図っていきたい。

参考文献

- 1) 鎌田恭典, 渡部聡, 安齋潤哉, 柴田健一: 渋滞対策を目的とした自発光式ペースメーカーの開発と運用について, 第 33 回交通工学研究発表会論文集, No.34, 2013
- 2) 松下剛, 吉川貴信, 大西隆信, 今代稔: 視覚に訴えた事故対策設備の速度抑制効果検証, 第 33 回交通工学研究発表会論文集, No.33, 2013
- 3) NEXCO 東日本管理事業部交通部交通課, 東北支社管理事業部交通技術課, 関東支社管理事業部交通技術課, LED 発光パネル (ペースメーカー) を活用した渋滞緩和対策, 道路行政セミナー, 2013
- 4) シーシーエス株式会社 HP, 明所視と暗所視の視感度レベル, https://www.ccs-inc.co.jp/guide/column/light_color/vol14.html (2017/10/11 参照)